密巻き超伝導磁石の機械的挙動に関する研究

尾形 英輝, 妹尾 和威*, 泉 佳伸, 江間喜美子, 西嶋 茂宏†

大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻 吹田市山田丘 2-1

(† E-mail: nishijim@nucl.eng.osaka-u.ac.jp)

*三菱電機(株) 先端総合研究所 尼崎市塚口本町 8-1-1

(2001 年 2 月 22 日受理)

Analysis of Wire Motion in a Superconducting Magnet
Using the Monte Carlo MethodHideki OGATA, Kazutaka SEO,* Yoshinobu IZUMI,
Kimiko EMA and Shigehiro NISHIJIMADepartment of Nuclear Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita 565-0871

* Mitsubishi Elec. Corp. Advanced Technology R&D Center, 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-7788

(Received February 22, 2001)

Synopsis: The wire motion in a superconducting magnet has been analyzed by means of the Monte Carlo method. A sufficient analysis of the instability originating from wire motion has not been made because wire motion has not been clarified at a singular area in the coil, such as a “cross over” position where one wire crosses over other wires in the lower layer. A winding compression test was also performed and the location of disturbances in the coil was determined by the acoustic emission method. It was clarified that, in the singular area of a coil, wire motion is easily generated. The experimental results were compared with those calculated. It was confirmed that the instability in a coil originates from wire motion mainly in the singular area.

Keywords: irregularly wound area, Monte Carlo method, wire motion

1. 序 論

超伝導磁石のクエンチの原因として、磁石内の機械的擾乱が挙げられる。最近の超伝導磁石では、コイル巻枠の除去等により線材-巻枠間摩擦発熱に起因するクエンチの問題は解決されつつある¹⁾。しかしながら、巻枠が除去できる磁石は含浸コイルの簡単な形状のコイルに限られるため、巻枠除去の手法が全ての超伝導磁石に適用できるわけではない。さらに、線材間摩擦発熱など、巻線の内部擾乱に起因するクエンチ現象のメカニズムについては、今なお解明されていないのが現状である。なぜならば従来の解析手法では多数の線材同士が接触、非接触を繰り返しながら動くプロ

セスの解析が困難であり、線材同士の摩擦発熱が評価できないという問題点があるためである。逆に言えば、通電時における線材の機械的挙動が明らかになれば、線材-巻枠間摩擦発熱のみならず、線材間の摩擦発熱、接触応力を解析することができ、超伝導磁石の安定性について定量的な議論が出来ると考えられる²⁻⁴⁾。そこで我々はモンテカルロ法を用いて巻線の機械的挙動を模擬する手法を開発した⁵⁻⁸⁾。これは三次元の体系で複数の線材同士が互いに相互作用を及ぼしあいながら平衡状態に達した時の線材の安定配置を、計算機により模擬する手法である。この解析法を用いた研究としては、CIC 導体内の素線の動きを解析した研究⁵⁻⁷⁾がある。これらの研究では CIC 導体内の素線の配置

を2次元で近似し導体を製作する過程の模擬⁵⁾、通電時の模擬⁶⁾、さらには計算と実験との比較の検討を行っている⁷⁾。一方、密巻コイルに関しては、その安定性の検討を行うため素線の動きを解析した研究⁸⁾がある。本研究では密巻きコイルに関し、開発したモンテカルロ法の妥当性を確認するため、実際に密巻きコイルを作成し計算結果と比較検討した。これまで開発してきたモンテカルロ法を用いて、実験結果と定量的に比較検討することは本研究が初めてである。

モンテカルロ法で実体系の超伝導磁石を解析するためには膨大な時間がかかるため、本研究では巻線部から一部を取り出したモデルに対して解析を行った。実体系の超伝導磁石を模擬できる計算コードを確立するとともに機械的擾乱の発生メカニズムを明らかにすることが本研究の目的である。また、開発したモンテカルロ法による解析結果の妥当性を検討するため、巻線の軸圧縮実験を実施し、応力-歪特性と計算結果を比較した。その結果、モンテカルロ法より求めたコイルの巨視的ヤング率及び散逸エネルギーと実験結果とが一致し、解析の妥当性が示された。また摩擦発熱の空間分布を計算することができ、線材の摩擦発熱の発生メカニズムを理解することができた。

2. 計算方法

2.1 解析手法

解析の基本的な実施法は以下のような手順で行った⁵⁻⁸⁾。(1) 線材の初期配置を仮定し、その配置でのポテンシャルエネルギーを計算する。次に、(2) 各要素を乱数により決定された微量 (ΔX , ΔY , ΔZ) 移動させ、その配置でのポテンシャルエネルギーを計算する。(3) 移動前後でポテンシャルエネルギーを比較し、移動後のエネルギーが低いときには、移動後を新しい安定な配置とする。(4) この手順を要素の数だけ繰り返し、これを1モンテカルロ時間とする。(5) これをエネルギーの停留点に到達するように繰り返し、ポテンシャルエネルギーが変化しなくなる安定な配置を求める。この求まった配置が線材の安定配置である。この配置から線材同士、線材と巻枠の接触応力を求めることができる。

ここで考慮したエネルギーは、(I) フックの法則より線材の張力変形によるエネルギー <Est>、(II) 梁理論より線材の曲がりによるエネルギー <Ebend>、(III) 線材同士の半径方向の変形によるエネルギー <Econtact>、(IV) 線材の巻枠に対する変形によるエネルギー <Ereact>を考慮した。<Econtact>、<Ereact>の計算にはヘルツの式を利用した。ヘルツの式を利用

すると、接触する物体が互いに力を及ぼし合い変形している状態を模擬することができる。各線材は要素ごとのエネルギーが計算され、それぞれの総和をもって系のポテンシャルエネルギーとした。また、線材同士が接触しながら動く場合(移動の前後で接触している場合)、線材のせん断変形エネルギー <Eshear>を考え最大静止摩擦力まで変形が起こると考えた。

<Eshear> は次のように計算した。静摩擦係数を μ ($=0.6$)、線材の単位長さ (1 m) あたりの垂直抗力を N 、接触長さを b とすると次式が成り立つ。これはせん断力を示しているが、これを積分することにより<Eshear>を計算した。

$$\tau = \mu \cdot N / b = G \tan \theta$$

ここで、 G はせん断弾性率、 $\tan \theta$ はせん断ひずみである。なお、今回の解析では、従来の解析で考慮していた線材の‘ねじれ’による歪エネルギーを省略している。これは、いままでの解析で、このエネルギーは十分小さく、全体の解析結果に有意な影響を与えないことが明らかになっているためである。

2.2 解析モデル

本研究においては Table 1 に示すような超伝導コイルを想定した。これは後述する実験に供したコイルを模擬したものである。また Table 2 にコイルに使用した線材のパラメータを示す。今回はこのような超伝導コイルの最内層中心部における線材の機械的擾乱について議論する。

Fig. 1 にコイル最内層中心部の巻線部のモデルを示す (3 層 14 ターンに相当)。このモデルからさらに 1/6 を切り出した (図中ハッチをつけた部分) モデルを今回の解析対象とした。この部分にクロスオーバー部が存在する場合と、存在しない場合に分けて解析を行った。

Table 1 Specifications of analyzed superconducting magnet.

Inner diameter	50.0 mm
Outer diameter	67.0 mm
Coil length	4.0 mm

Table 2 Mechanical properties of the wire.

Diameter	0.8 mm
Cu / NbTi ratio	1.5
Young's modulus	117.6 GPa
Poisson's ratio	0.3

Fig. 1 Calculated model by Monte Carlo method.

2.3 境界条件

Fig. 2 に各サンプルコイルの巻線後の線材の安定配置（計算結果）を平面展開で表示したモデルを示す。本図の R , θ はそれぞれ巻半径と方位角を示しており、それゆえ縦軸の $R \times \theta$ は周方向距離を示している。また横軸の z はコイル軸方向距離であり、Fig. 1 の高さに相当する。この図では Fig. 1 のコイルのハッチを入れた部分を示しているのであるが、Fig. 1 の左右の部分との境界面は、Fig. 2 では横軸に平行な上下の面に相当している。縦軸は周方向距離を現している。また、Fig. 2(a) はクロスオーバー部が無く、(b) はクロスオーバー部のあるモデルである。解析モデルの境界面には次の境界条件を導入して計算した。

- 1) 線材は常に境界面と直交する。つまり、線材は、Fig. 2 の上下の面に直交している。
- 2) 境界面では面内の滑りのみを許容する。つまり、Fig. 2 の上下面にある線材のメッシュは、常にこの面内を動く。

3. 計算結果

3.1 軸圧縮模擬

解析は各サンプルコイルに対して、40 MPa までの負荷、除荷模擬を行い、巨視的ヤング率及び散逸エネルギーを計算した。Fig. 3 に解析結果を示す。図よりクロスオーバー部を含む巻線には応力-歪線図にヒステリシス現象が見られ、エネルギーが散逸したことが確認できる。これは、クロスオーバー部における線材の力伝達の不連続性が原因で機械的擾乱が多く発生したためと考えられる。またクロスオーバーが無い巻線では、線材が積層みの状態で配置されているため線材のずれによるエネルギーの散逸はほとんど無いことが理

Fig. 2 Stable position of wires: (a) cross over-free wound coil and (b) irregularly wound coil (cross over area).

Fig. 3 Compressive stress-strain diagram of cross over-free wound and irregularly wound coil in the axis direction.

Table 3.1 Calculated macroscopic Young's modulus of sample coils.

Cross over-free wound coil	43.0 GPa
Irregularly wound coil	25.7 GPa

Table 3.2 Calculated energy dissipation of sample coils.

Cross over-free wound coil	0.28 mJ
Irregularly wound coil	2.10 mJ

解できる。

Table 3.1 に各巻線部の巨視的ヤング率を、Table 3.2 にヒステリシスの面積から計算した散逸エネルギーを

Fig. 4 Tensile stress-strain diagram of cross over-free wound and irregularly wound coil in the radial direction.

示す。なお、巨視的ヤング率は Fig. 3 の加重負荷時の応力-歪線図から求めた。特に、クロスオーバーを含む巻線に関しては、加重の立ち上がりから加重除荷直前までの範囲で計算している。この図から分かるように、クロスオーバー部を含む巻線では、含まない巻線の約 60% のヤング率であり、また散逸エネルギーも約 7.5 倍も大きい。すなわちクロスオーバー部（あるいは巻乱れ）があると、ヤング率の低下とその部分での散逸エネルギーが大きくなることが、定量的に示されたといえる。

3.2 径方向変形模擬

次に、コイル径方向にフープ力がかかった状態を想定し径方向変形模擬を行った。これは巻線半径を変化させることで実施した。Fig. 4 に解析結果を示す。図より径方向に変形した際には線材のずれが無いことを反映し、ヒステリシスは小さく、両コイルとも散逸エネルギーはほとんど無いことが分かる。

Fig. 3, Fig. 4 の結果を総合すると、通電時においても散逸エネルギーのほとんどは線材の軸方向へのずれに起因するのではないかと考えられる。

4. 実験

4.1 軸圧縮試験

解析結果の妥当性を確認するため、本研究では軸圧縮試験を実施した。Fig. 5 に実験の構成を示す。ロードセルで荷重を、コイル中心部に取り付けた歪みゲージにより歪み量を測定した。またフランジ上下に取り付けた AE センサにより擾乱の発生頻度を測定し、巻線構造と擾乱の発生挙動について評価した。

Fig. 5 Schematic illustration of the sample coil.

本研究では、巻線構造と機械的擾乱の発生との関係について検討するため、クロスオーバー部の存在しない一方巻きコイルとクロスオーバー部がコイル巻線部中に均一に分布した乱れ巻きコイルの 2 種類のサンプルコイルを用意した。両コイルともエポキシで含浸しており、巻張力は 9.8 N である。コイルの大きさは、Table 1 に示した通りである。サンプルは液体窒素で浸漬冷却し、12, 24, 36, 40 MPa の順に負荷、除荷を繰り返して行い、応力-歪特性及び AE の測定を行い、応力-歪線図から巨視的ヤング率を計算した。

4.2 実験結果

Fig. 6 に各サンプルコイルの応力-歪線図及び負荷回数毎の AE 発生挙動の測定結果を示す。本図では横軸に応力をとっており、通常の線図と縦軸と横軸が異なっている。また AE のデータでは、その応力で発生した AE を丸印で振幅を線の長さで示している。図より一方巻きコイルでは、AE 挙動にカイザー効果がみられる。この AE は含浸材のクラック発生に起因していると考えられ⁹⁾、負荷回数とともに AE 発生個数が減少していることが分かる。一方、乱れ巻きコイルではカイザー効果が見られず、繰り返し AE が放出されており、線材の摩擦挙動を反映している^{10, 11)}。

Table 4.1 に各サンプルコイルの実験的に求めた巨視的ヤング率を示したが、Table 3.1 のモンテカルロ法による計算結果と比較すると、両者はほぼ一致していることが分かる。なお、実験結果より巨視的ヤング率を計算する時は（特に乱れ巻きコイルの場合）、3 回目の加重上昇時の線図を利用している。

また、Table 4.2 に実験的に求めた散逸エネルギーを示す。モンテカルロ法で求めた散逸エネルギーは、解析対象は 1/6 コイルで、最内層から 3 層である (Table

Fig. 6 Stress-strain and stress-ae diagrams of : (a) cross over-free and (b) irregularly wound coil.

3.2). 計算結果と実験結果を直接比較するため、この表 (Table 4.2) では得られた散逸エネルギーを解析モデルでの体積に換算して示してある。

Table 4.1 Macroscopic Young’s modulus of sample coils obtained in experiments.

Cross over-free wound coil	42.3 GPa
Irregularly wound coil	22.8 GPa

Table 4.2 Energy dissipation of sample coils obtained in experiments.

Cross over-free wound coil	0.78 mJ
Irregularly wound coil	9.22 mJ

一方向巻コイルで 2.8 倍、乱れ巻きコイルで 4.4 倍実験結果の方が大きい。しかし解析モデルでは巻張力 は無くしかも含浸無しであり、必ずしも実験コイルを 正確にモデル化できていない (精緻にモデル化すること は事実上不可能に近いと考えられる)。モデルの不 備を考えると、実験結果は解析結果とほぼ一致してい ると考えても良いと思われる。すなわち開発した本解 析法をコイルの解析に利用することは原理的に可能で あると考えられる。

5. 安定性の検討

5.1 通電模擬

前節までで解析法の妥当性が示されたので、以下本 手法を用いて擾乱の発生機構について議論する。コイルの通電状態における散逸エネルギーの推定が、安定性を議論するためには必要である。いままでの解析や 実験は、軸圧縮あるいはフープ力の個別の印加による ヒステリシスを計算したもので、砺磁の時のような フープ力下での圧縮変形に伴う擾乱を解析したもので はない。そこで、安定性について議論するため、通電 時の擾乱について検討した。実際の超伝導磁石では、 フープ力がかかりながら軸方向にずれるため、線材同 士の接触応力が高くなり、結果的に MQE (最小クエン チエネルギー) に相当する擾乱が発生しやすくなる のではないかと考えられるからである¹²⁾。

そこで、解析モデルに対し 65.8 A までの通電模擬 を実施した。電磁力の解析では、まず有限要素法を用 い巻乱れが無い状態での磁場計算を行った。続いて、 計算された磁場と電流との相互作用で電磁力が働くとし て、電磁力を計算し、線材の配置はモンテカルロ法

Fig. 7 Correlation between electromagnetic force and strain of cross over-free wound coil and irregularly wound coil.

で計算している。

Fig. 7 に方向巻きコイルあるいは乱れ巻きコイルに蓄えられる軸方向歪みと電磁力（電流値の2乗に比例）の関係を示す。本グラフの横軸 $(I / I_{op})^2$ は各電流値を通電電流値 (I_{op}) 65.8 A で規格化したものの自乗であり、電磁力に比例する指標である。

乱れ巻きコイルにおいて、励減磁の際にヒステリシス現象を確認することができた。通電電流 56.9 ~ 65.8 A (65.8 A で軸圧縮応力で約 11 MPa に相当) の間に散逸したエネルギーを計算すると 81.7 μ J であった。最小クエンチエネルギー (MQE) は 143 μ J であるため、クエンチには至らないことが確認できる。しかしながら、軸圧縮応力のみ印加で 6 ~ 11 MPa までに発生する擾乱は 43.2 μ J で、軸圧縮モデルから予想される発熱量よりかなり高く、フープ力の擾乱に及ぼす効果は明らかである。ちなみに通電電流 65.8 A の磁場 (5 T) における臨界電流は 424 A であり、この時点で既に 81.7 μ J の発熱があることになり、フープ力下における線材の軸方向へのずれがクエンチの原因となり得ることを示唆している。

5.2 摩擦発熱の空間分布

コイル内の擾乱発生メカニズムについて検討するため、軸圧縮模擬の際、クロスオーバー部のある巻線の第2層目における線材間摩擦発熱を計算した。実際のコイル内の励磁に伴う発熱は、軸圧縮単独より大きいことが前節で示されているが、ここでは発熱の空間分

Fig. 8 Distribution of frictional heating in the 2nd layer (at low-operation current).

Fig. 9 Distribution of frictional heating in the 2nd layer (at high-operation current).

布及び擾乱の発生メカニズムを議論することを目的としている。それゆえここでは解析が容易な軸圧縮試験で励磁を代用することにした。

Fig. 8 に通電開始直後（軸圧縮試験直後という意味）における線材間摩擦発熱の空間分布を示す。この図では図中線の A, B と平行な軸が Fig. 2 の z 軸に相当し、両線に垂直な軸が、Fig. 2 の $R \times \theta$ 軸に相当する。また、図の線 A, B はクロスオーバー部に相当し、Fig. 2(b)の線材が交差している部分を z 軸に平行に結んだ直線を意味している。この図から、低応力領域ではクロスオーバー部で線材間摩擦発熱が高い頻度で発生していることが分かる。図のようにピーク値がほぼ同じ値をとるのは、クロスオーバー部上にある線材のずれが他の線材に伝播していくためであると考えられ、実際の超伝導コイルにおいても線材が一斉に動き出す

Fig. 10 Cross sectional view of line A1 of the coil in Fig. 9.

ことによりクエンチに至るのではないかと考えられる。

Fig. 9 に高応力域（軸圧縮応力が 11 MPa 以上をここではこう呼ぶことにする）における線材間摩擦発熱の空間分布を示す。図より、コイル端部の線材間摩擦が大きく、その発熱量も低応力域の約 35 倍にも達することが分かる。

Fig. 10 に断面 A1 の線材の配置を示す。フランジ部に接した第 2 層目の線材が 1 層目、3 層目の線材を押し分けながら、コイル中央部に向けて軸方向に進むことで摩擦発熱が大きくなるため Fig. 9 のような発熱分布になると理解できる。この箇所は、実際の超伝導コイルでは段上がり部に相当すると考えられ、この部分では軸方向に対して線材占有率を高く設定し、巻線しなければならないことを示唆している。実際は、巻線時にこの部分に詰め物をして巻線しているが、この発熱を抑えるために行っているものと理解できる。

これらの解析より、低応力領域ではクロスオーバー部の摩擦発熱が重要であり、また高応力領域ではコイル端部の段上がり部の発熱が重要であると言える。

6. 結 論

本研究では、密巻きコイル内の内部擾乱を 3 次元的に解析するために、モンテカルロ法を開発し、実験結果と比較することにより以下の結論を得た。

- 1) 軸圧縮模擬について、巨視的ヤング率の値を実験と比較することにより、本計算コードの妥当性を確認した。
- 2) 実際のコイルを定量的に模擬するためには、詳細なモデル化が必要であるが、本解析手法を用いることで、コイルの応力-歪曲線のヒステリシスを再現するとともに散逸エネルギーを計算することができるようになった。
- 3) 本解析手法を用い、コイルの励磁模擬を行ったところ、励磁開始直後ではクロスオーバー部、さらに電流値を上げるとコイル端部の順に線材

間摩擦発熱が大きくなることが明らかになった。

本モンテカルロ法を用いた解析手法は巻線を構成する線材の安定配置を求めることができ、応力分布、摩擦発熱分布を計算することが可能である。特に、段上がり部、クロスオーバー部に代表されるような力伝達の悪い箇所の線材間摩擦発熱を計算することが出来る特徴を有することが明らかになった。このことは本解析手法が安定な超伝導磁石製作の具体的指針を与え得る可能性を示していると言える。

参 考 文 献

- 1) M. Urata: Compact 17T epoxy impregnated magnet without bore tube, *Cryogenics*, **31** (1991) 570
- 2) T. Kushida: Calculation of wire movement in a superconducting magnet, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **7** (1997) 167
- 3) S. Nishijima: Simulation of wire movement in a superconducting coil, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17** (1997) 163
- 4) S. Nishijima: Stress analysis in shear / compression tests, *Cryogenics*, **35** (1995) 681
- 5) T. Sasaki and S. Nishijima: Mechanical behavior of strands in CIC conductor analyzed by Monte Carlo method, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **9** (1997) 571
- 6) S. Nishijima, T. Sasaki, et al.: Monte Carlo calculation of strand position in CIC conductor to analyze mechanical loss, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11** (2001) 1462
- 7) T. Sasaki, S. Nishijima, et al.: Monte Carlo simulation of strand motion in CIC conductor, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **10** (2000) 1094
- 8) H. Ogata: Analysis of Wire Motion in a superconducting magnet by Monte Carlo, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11** (2001) 1470
- 9) O. Tsukamoto: Epoxy cracking in the epoxy-impregnated superconducting winding, *IEEE Trans. Magn.*, **21** (1985) 377
- 10) E.S. Bobrov, J.E.C. Williams and Y. Iwasa: Experimental and theoretical investigation of mechanical disturbances in epoxy-impregnated superconducting coils, *Cryogenics*, **25** (1985) 307
- 11) H. Moriyama: Effect of ground insulation contact on stability of epoxy-impregnated superconducting solenoids, *Cryogenics*, **35** (1995) 825
- 12) L. Dresner: Quench energy of potted magnet, *IEEE Trans. Magn.*, **2** (1985) 39